

MÉTODOS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE REACTIVIDAD

Agustín ZUÑIGA

Instituto Peruano de Energía Nuclear
Apdo. 1687 - Lima 13 - Perú

RESUMEN

Se ha determinado experimentalmente la reactividad de las barras de control del reactor RP - 0 del Instituto Peruano de Energía Nuclear. Se han utilizado los métodos del período de "rod - drop" y de la fuente, respectivamente. Las discrepancias de los dos últimos métodos respecto del primero son del 5 0/o y 2 0/o, respectivamente.

ABSTRACT

The reactivity of control rods is measured for the RP - 0 reactor at the Peruvian Nuclear Energy Institut. The methods of period rod drop and source were used. The results obtained by the last methods have differences of 5 0/o and 2 0/o relative to the first.

1. INTRODUCCION

La reactividad es un parámetro que indica el estado de un reactor que es función de variables nucleares o geométricas. La reactividad puede medirse con métodos estáticos, dinámicos, estadísticos y analógicos. En este trabajo usamos tanto los métodos estáticos sobre la fuente y el período como el método dinámico de "rod - drop". Los métodos utilizados se basan en el modelo puntual que tiene su origen en la ecuación de Boltzmann [1]. Un análisis teórico puede encontrarse en la ref. [2].

2. DESCRIPCIÓN TEÓRICA

ECUACIONES DE LA CINÉTICA PUNTUAL

Las relaciones base para los diversos métodos a emplearse son las denominadas puntuales que vienen dadas por las ecuaciones siguientes* [2].

(*) Los símbolos se dan al final del trabajo.

$$n(t) = \frac{\rho - 1}{\Lambda^*} n(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) + q(t) \quad (1)$$

$$\dot{C}_i(t) = \frac{\beta_i}{\Lambda^*} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

se demuestra [3], que la respuesta del reactor para una reactividad constante, en el espacio transformado con una fuente externa dentro del sistema viene dado por la ecuación.

$$N(S) = N(0) [\Lambda^* + P(S)] G(S) + \Lambda^* Q(S)G(S) \quad (3)$$

$$P(S) = \sum_{i=1}^I \frac{\beta_i}{S + \lambda_i} \quad (4)$$

$$G(S) = \frac{1}{S [\Lambda^* + P(S)] - \rho} \quad (5)$$

ECUACION INHOUR

Se le denomina así a la ecuación siguiente:

$$S \left(\Lambda^* + \sum_{i=1}^I \frac{\beta_i}{S + \lambda_i} \right) - \rho = 0 \quad (6)$$

cuyas raíces se denotan por γ_j ($j=0, 1, \dots, 6$) y

$$G(S) = \sum_{j=0}^6 \frac{A_j}{(S - \gamma_j)} \quad (7)$$

donde los coeficientes resultan:

$$A_j = \frac{1}{\Lambda^* + \sum_{i=1}^I \frac{\beta_i \lambda_i}{(\gamma_j + \lambda_i)^2}} \quad (8)$$

2.1 METODO DEL PERIODO POSITIVO

Sea el reactor en estado crítico sin fuentes externas. Se introduce o quita (período positivo) reactividad rápidamente. Veamos la evolución de la población neutrónica:

Se demuestra [3], que en tal situación

$$n(t) = n(0) \Lambda^* \sum_{j=0}^{\infty} A_j e^{\gamma_j t} + n(0) \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{b_i A_j}{(\gamma_j + \lambda_i)} (e^{\gamma_j t} - e^{-\lambda_i t}) \quad (9)$$

que para tiempos suficientemente largos se reduce a una expresión de la forma

$$n(t) = \text{cte.} \cdot e^{\gamma_1 t} \quad (10)$$

Si se toma el período asintótico $1/\gamma_1 = T$, la ecuación inhour resulta

$$\beta = \frac{\Lambda^*}{T} + \sum_{i=1}^L \frac{b_i}{\frac{1}{T} + \lambda_i} \quad (11)$$

que es la ecuación que permite relacionar al período del reactor con la reactividad y justifica el método del período positivo o de doblaje de flujo.

2.2 METODO DE ROD - DROP

Conjuntamente con el método del período éste es uno de los más usados. En este método se considera que en el reactor en estado crítico sin fuentes externas, se introduce súbitamente reactividad negativa. Se puede demostrar [3], que la solución a tal situación de la ecuación cinética resulta

$$-\beta = n(0) \frac{\Lambda^* + \sum_{i=1}^{\infty} b_i / \lambda_i}{\int_0^{\infty} n(t) dt} \quad (12)$$

que es la ecuación que justifica el método de rod - drop.

En la referencia [4] plantea un método más rápido que el basado en la ec. (12). Se plantea la relación.

$$\frac{K_{ef} - 1}{\beta_{ef}} = C(R - 1) \quad (13)$$

donde $C = 0.367$ constante de Schultz;

$$R = n_0^T / \int_{\epsilon}^{\epsilon+T} n(t) dt.$$

con $T \approx 15$ a 20 seg.; n_0 = población neutrónica en equilibrio. ϵ = instante de introducción de reactividad, β_{ef} = fracción efectiva total de neutrones de fisión que son retardados.

2.3 METODO DE LA FUENTE

Este método, que no es tan usado como los anteriores, lo seguiremos con fines de comparación. Se le llama también método absoluto de multiplicación de la fuente puesto que se basa en la ecuación que describe a la población neutrónica cuando el reactor está en un estado estacionario subcrítico.

La justificación teórica del método surge de considerar los siguientes dos problemas: a) con el reactor en estado subcrítico sin fuente exterior e introducción posterior de una fuente constante y b) con el reactor en estado crítico sin fuente exterior e introducción posterior de una fuente externa, constante.

Se demuestra [3] para el caso (a) la población subcrítica en un tiempo suficientemente largo está dada por

$$n_{SC} = n(t \rightarrow \infty) = - \frac{\Lambda^* A}{\beta} \quad (14)$$

para el caso (b) se demuestra que la población asintótica para tiempos suficientemente largos está dada por la relación

$$n_{as} = n(t \rightarrow \infty) = n_0 (\Lambda^* A_1 + A_1 \sum_i^b i / \lambda_i) + \Lambda^* A A_1 t \quad (15)$$

de donde resulta

$$\dot{n}_{as} = \Lambda^* A A_1 \quad (16)$$

donde A_1 es el primer coeficiente de ec. (8), y $\dot{n} = dn/dt$ de las ecuaciones (14) y (16) resulta que la reactividad viene dada por la relación

$$-\beta = \frac{1}{A_1} \frac{\dot{n}_{as}}{n_{SC}} \quad (17)$$

como se observa este método sigue dos pasos; 1o.) determinación de la pendiente y 2o.) Medición de la población subcrítica.

3. DESCRIPCION EXPERIMENTAL

En toda instalación nuclear, se requiere seguir previamente a su utilización ciertas normas que tienen que ver con la seguridad tanto de la instalación como del usuario, tales normas no serán expuestas en el trabajo, sólo nos referiremos al procedimiento propiamente dicho.

La utilización de los tres métodos antes descritos la haremos en un caso práctico como es la determinación del valor en reactividad de las barras de control del RP - O. Sin embargo estos métodos pueden usarse para medir reactividades de cualquier componente o sustancia.

3.1 METODO DEL PERIODO

1. Se lleva el reactor al estado crítico en una secuencia de barras de configuración del núcleo que permita calibrar la barra deseada, ejem: 1, 3, 2, 4 para el caso que la barra problema sea la barra No. 2, tomando como compensadora a su simétrica la barra No. 4. En cambio si la barra No. 1 fuera el problema, una secuencia adecuada sería 2, 4, 1, 3.
2. Estando en crítico el reactor se extrae una porción de la barra calibrar (No. 2) haciendo al reactor ligeramente supercrítico.
3. Transcurrido un cierto tiempo lo suficientemente como para que desaparezcan los transitorios se mide el tiempo empleado para que el flujo se duplique (T_2) a partir del cual se determina el período del reactor vía ec. (10).

Se repiten los pasos 1o, 2o, 3o para cada porción de barra hasta alcanzar toda su longitud. Este procedimiento se esquematiza en la Fig. No. 1.

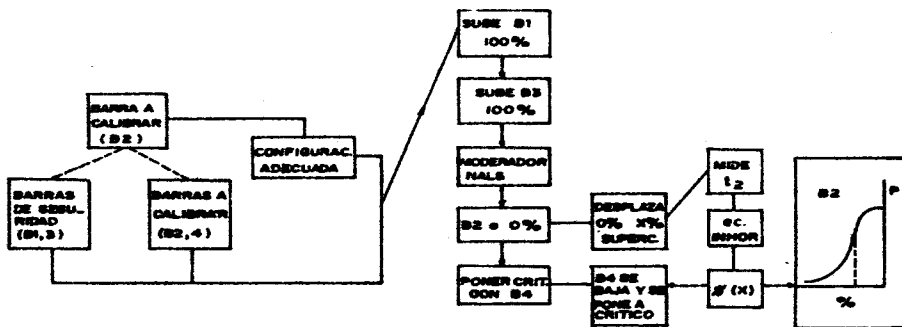


Fig. 1. Esquema del procedimiento de calibración de barras según el método del período positivo. (Dobleje de flujo).

3.2 METODO DE ROD - DROP

1. Se lleva el reactor al estado crítico (0.1 w) con una secuencia y configuración de núcleo adecuada para el caso de la barra No. 2 se repite el paso 3.1.1 del método del período.
2. Se suben las barras No. 1 y No. 3 hasta el límite superior luego la barra No. 2 hasta la posición cuyo valor se desea medir por caída de barra (scram parcial).
Se pone a crítico al reactor con la barra No. 4.
3. Se hace scram parcial con la barra No. 2 y se obtienen las integrales (ver ec. (12) y (13)).
Se repiten los pasos 1o, 2o, 3o hasta abarcar toda la barra si la secuencia lo permite.

3.3 METODO DE LA FUENTE

3.3.1 DETERMINACION DE LA PENDIENTE (λ_{sc})

1. Se lleva a crítico al reactor en una secuencia de barras y configuración de núcleo adecuada que permita la calibración de la barra deseada, similar al paso 3.1.1 del método del período pero a una población neutrónica razonablemente baja ≈ 4000 c/s.
2. Se introduce la fuente externa de neutrones dejando evolucionar a la población neutrónica. Se espera un tiempo lo suficientemente prolongado a fin de observar que tal evolución sea completa y se exprese como una recta que es como debe ser en el caso de criticidad, o si por el contrario tiende a subir o bajar, lo que indicaría que existe una reactividad residual que lo hace ligeramente supercrítico o subcrítico respectivamente.

3.3.2 MEDICION DE LA POBLACION SUBCRITICA ESTACIONARIA

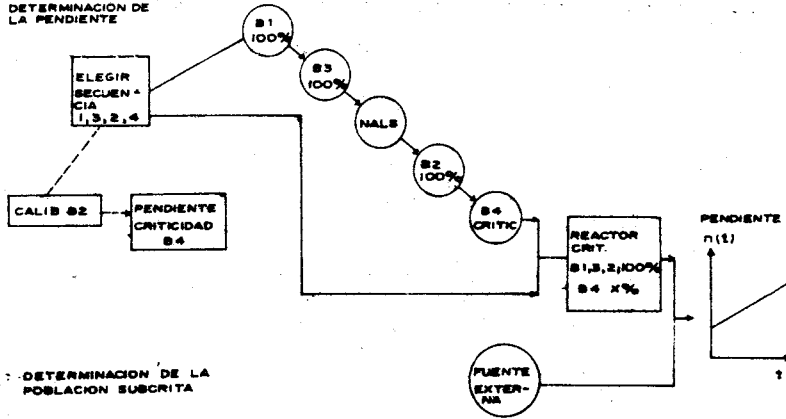
1. Se repite el paso 3.3.1.1
2. Con la barra que se pretende calibrar (barra No. 2) se introduce cierta reactividad cuyo valor se desea medir. Se lleva así al reactor a un estado subcrítico.
3. Se introduce la fuente con el fin de obtener el estado subcrítico estacionario midiéndose en estas condiciones la población subcrítica (n_{sc}).

Se repite el paso 3.3.2.2 para las diversas porciones de barra.
Este procedimiento se esquematiza en la Fg. No. 2

3.4 EQUIPO

| | | |
|---------------------|---|---|
| Reactor | : | Reactor de potencia 1 W del Instituto Peruano de Energía Nuclear. |
| Cronómetros | : | 2 Seiko 80 - 5011 |
| Multicanal | : | MCA GANBERRA serie 30,1024 canales |
| Fuente de Neutrones | : | 4.24×10^5 n/seg. 4n al 16.07.77 |

PASO 1: DETERMINACION DE LA PENDIENTE



PASO 2: DETERMINACION DE LA POBLACION SUBSCRITA

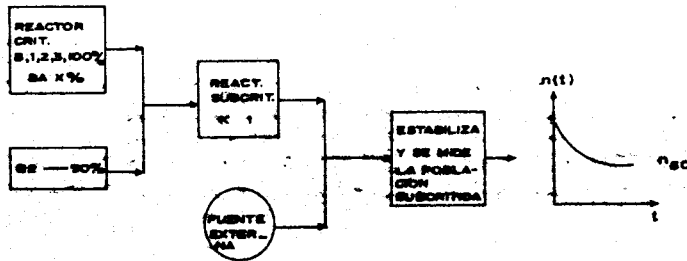
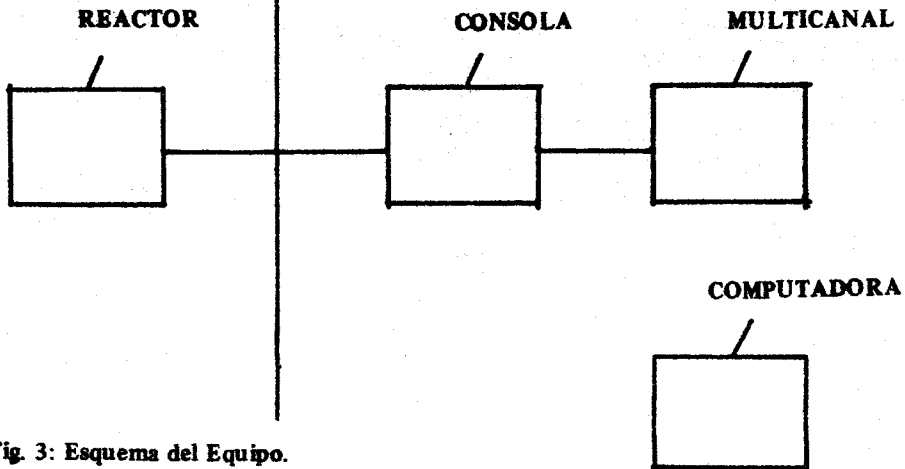


Fig. 2. Esquema del procedimiento de calibración de barras según el meda de la fuente.

RECINTO

SALA DE COMANDO



* Fig. 3: Esquema del Equipo.

4. TRATAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

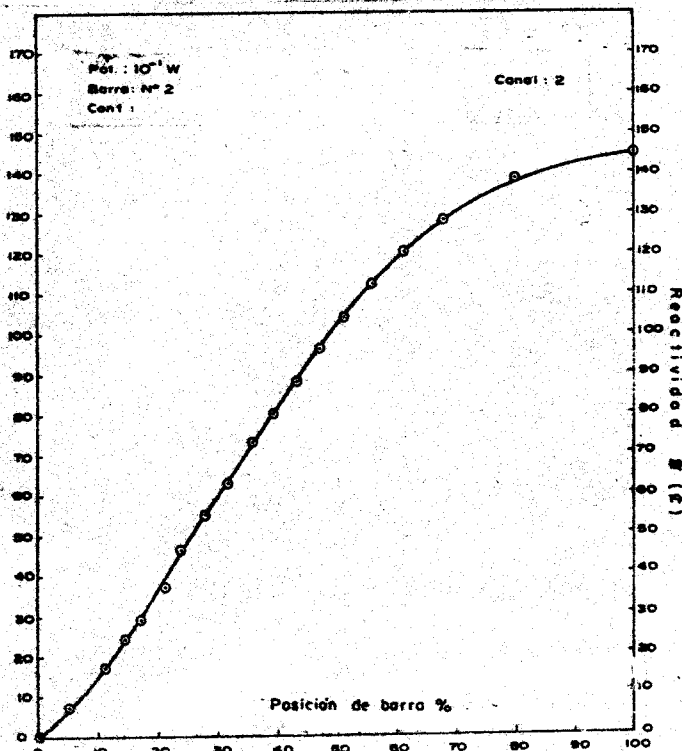
Los datos nucleares que utilizaremos en nuestro trabajo son presentadas en la tabla 1.

TABLA No. 1

Constantes de Decaimiento y Abundancias Relativas de Neutrones Retardados para Fisiones Térmicas [2] U^{235} (99.9 o/o 235)

| Grupo i | Cte. de Decaim. λ_i (seg ⁻¹) | Abundancia relativa bi |
|------------|---|---------------------------|
| 1 | 0.0124 | 0.033 |
| 2 | 0.305 | 0.219 |
| 3 | 0.111 | 0.196 |
| 4 | 0.301 | 0.395 |
| 5 | 1.14 | 0.115 |
| 6 | 3.01 | 0.042 |

Fig. 4. Medición de Reactividad Método Período Positivo



4.1 PARA EL CASO DEL METODO DEL PERIODO POSITIVO

El valor de la reactividad quitada del sistema por la porción extraída de la barra a calibrar, se determina a partir del período, que se obtiene a partir del tiempo empleado para que el flujo se duplique vía la ec (11).

Resultados para la barra No. 2, aparecen en la Tabla No. 2 y Fig. 4

TABLA No. 2

Determinación de Reactividad de la Barra No. 2

Método Período Positivo

Conf : 38

Poten : 0.1 w

Fecha: Oct. 82

| Cotas en o/o Calib. B2 | B. extraída Compens B4 | Tiempo de doblaje (seg) | Período T (seg) | Reactiv β (Q) | Reactiv. acumul. | |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|---------|
| | | | | | β B2 | β B2 |
| 0.0 - 5.2 | 74.8 - 68.3 | 101.7 | 146.6 | 7.264 | 7.264 | 144.482 |
| 5.2 - 10.7 | 68.3 - 62.0 | 76.6 | 110.4 | 9.146 | 16.410 | 137.218 |
| 10.7 - 14.4 | 62.0 - 57.8 | 100.1 | 144.3 | 7.360 | 23.770 | 128.072 |
| 14.4 - 17.0 | 57.8 - 54.6 | 129.9 | 201.8 | 5.539 | 29.309 | 120.720 |
| 17.0 - 20.7 | 54.6 - 50.5 | 88.1 | 127.1 | 8.167 | 37.476 | 115.173 |
| 20.7 - 24.2 | 50.5 - 46.7 | 85.7 | 123.6 | 8.355 | 35.831 | 107.006 |
| 24.2 - 28.0 | 46.7 - 42.7 | 79.9 | 115.3 | 8.835 | 54.666 | 98.651 |
| 28.0 - 32.0 | 42.7 - 39.2 | 79.1 | 114.0 | 8.915 | 63.581 | 89.816 |
| 32.0 - 36.0 | 39.2 - 35.6 | 75.8 | 109.4 | 9.212 | 72.793 | 80.901 |
| 36.0 - 39.5 | 35.6 - 32.5 | 92.8 | 133.9 | 7.827 | 80.621 | 71.689 |
| 39.5 - 42.7 | 32.5 - 29.6 | 105.4 | 152.0 | 7.048 | 87.669 | 63.861 |
| 42.7 - 46.9 | 29.6 - 26.6 | 89.2 | 128.0 | 8.055 | 95.754 | 56.813 |
| 46.9 - 51.2 | 26.6 - 23.3 | 84.7 | 122.1 | 8.437 | 104.191 | 48.728 |
| 51.2 - 55.9 | 23.3 - 20.2 | 95.1 | 137.1 | 7.677 | 111.869 | 40.291 |
| 55.9 - 61.3 | 20.2 - 16.4 | 89.2 | 128.7 | 8.085 | 119.954 | 32.613 |
| 61.3 - 68.0 | 16.4 - 12.9 | 93.8 | 135.3 | 7.761 | 127.715 | 24.528 |
| 68.0 - 80.3 | 12.9 - 7.2 | 62.6 | 90.2 | 10.708 | 138.423 | 16.767 |
| 80.3 - 100.0 | 7.2 - 3.0 | 126.0 | 181.8 | 6.059 | 144.482 | 6.059 |

4.2 PARA EL CASO DEL METODO DEL ROD - DROP

Si seguimos el método de la constante de Schultz para la determinación de las áreas re-
currimos a la función MCS del multicanal [6], que nos da las áreas directamente, las que son
llevadas a la ecuación (13).

• Resultados para la barra No. 2 aparecen en la Tabla No.3 y Fig. 5.

TABLA No. 3

Determinación de Reactividad de la Barra No. 2
Metodo de Rod - Drop

Conf. : 38
Ponten : 0.1 W
Fecha : Oct. 82

| Cotas en % extraída | Area antes | Area des- | Reactividad |
|---------------------|------------|-----------|-------------|
| Calib | Compens | pués | |
| Barra 2 | Barra 4 | 15.3" | \$ |
| 100 | 60.2 | 263258 | 1.386 |
| 90 | 62.3 | 268175 | 1.198 |
| 80 | 64.3 | 313477 | 1.162 |
| 70 | 69.7 | 234048 | 1.089 |
| 65 | 75.0 | 150699 | 0.954 |
| 60 | 83.3 | 240680 | 1.021 |
| 56.7 | 100.0 | 300420 | 0.937 |

Fig. 5. Medición de Reactividad
Método ROD - DROP

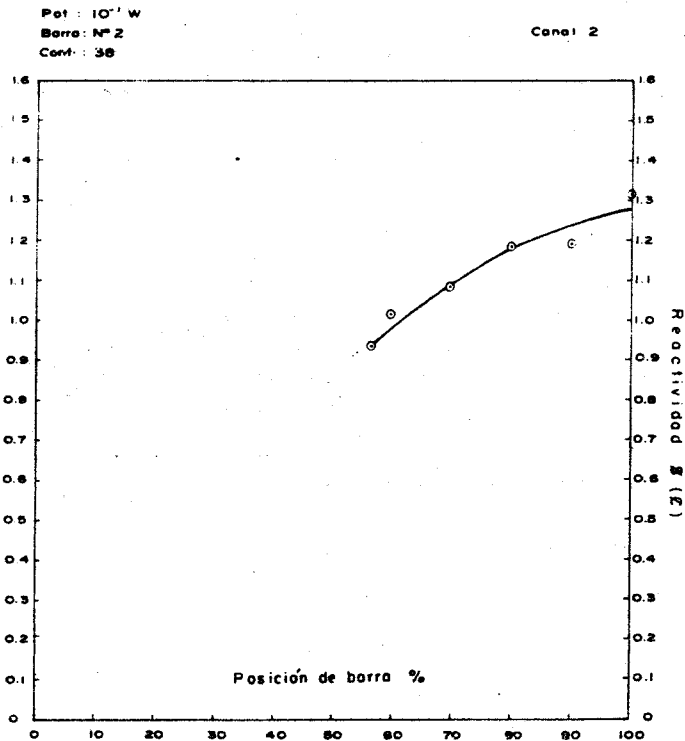


Fig. 6. Medición de Reactividad Método de la Fuente
Determinación de la Pendiente

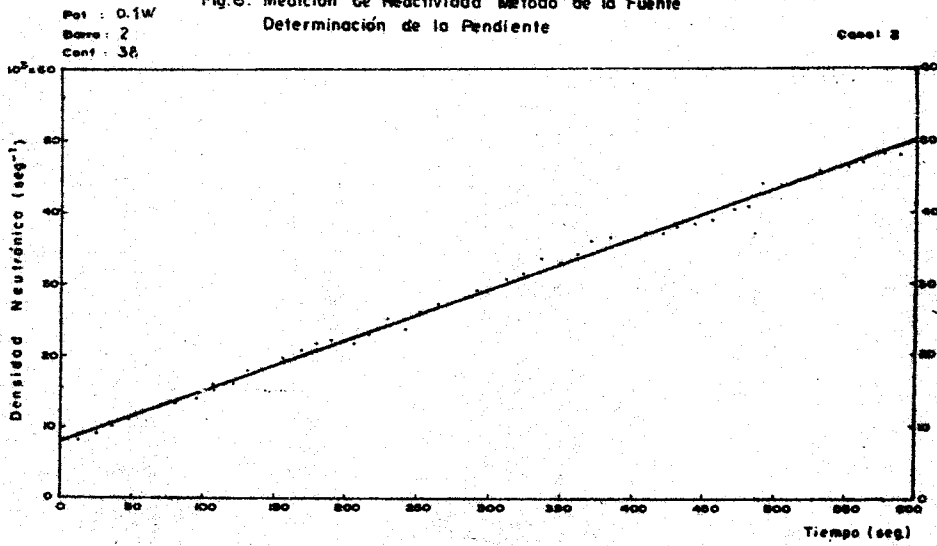
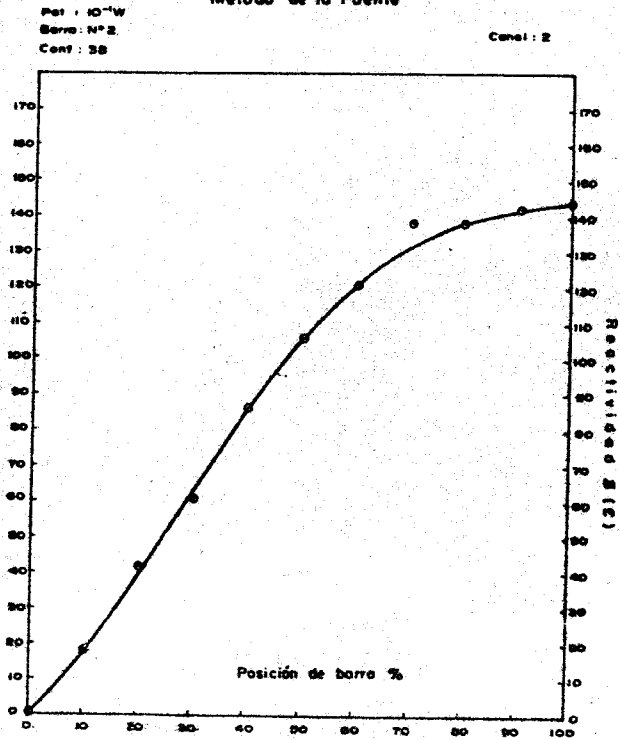


Fig. 7. Medición de Reactividad Método de la Fuente



4.3 PARA EL CASO DEL METODO DE LA FUENTE

Para la determinación de la pendiente se registran las cuentas de la población neutrónica hasta unos 700 seg. y por mínimos cuadros se calcula la pendiente como se observa en la Fig. 6.

La determinación de la población subcrítica, fue previamente corregida por el tiempo muerto del canal de salida del reactor $\tau = 14.56$ [5].

Los resultados para la barra No. 2 aparecen en la Tabla No. 4 y Fig. 6,7.

TABLA No. 4

Determinación de Reactividad de la Barra No. 2 Método de la Fuente

Conf : 38
Poten: 0.1 W
Fecha: Oct. 82
Canal : 2

| Cota de 0/o B. Extraída Barra 2 | Población Subcrítica | Reactividad (ρ) |
|------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 89.00 | 50317.35 | 1.686 |
| 80.00 | 16307.97 | 5.202 |
| 70.00 | 7364.43 | 11.518 |
| 60.00 | 3626.15 | 23.393 |
| 50.00 | 2225.62 | 38.114 |
| 40.00 | 1464.81 | 57.910 |
| 30.00 | 1028.48 | 82.478 |
| 20.00 | 838.83 | 101.125 |
| 10.00 | 675.59 | 125.559 |
| 0.00 | 589.42 | 143.915 |

5. CONCLUSIONES

1. El método del período es el más factible tanto por su sencillez y precisión para pequeñas reactividades, como por sus pocas limitaciones teóricas. El método de rod - drop es adecuado para grandes reactividades.
El método de la fuente con una precisión ligeramente menor que la del período, no es muy frecuentemente usada por la dificultad de tener con bastante precisión al reactor en crítico para tiempos lo suficientemente largos, manteniéndose realmente una recta.
2. Puesto que el parámetro reactividad es de mucha importancia su medición es dolizada, razón por la que es necesario varios métodos disponibles para la comparación. Sin embargo en la actualidad existen servomecanismos analógicos como los reactímetros que permiten medir la reactividad directamente.
3. En el trabajo se han expuesto los métodos referidos a una barra, sin embargo los mismos pasos se ejecutan para cualquier otro componente cuya reactividad se desea medir.

APENDICE

SIMBOLOGIA

- n población neutrónica para un instante dado
\$ parámetro reactividad en unidades de dólares
 Λ tiempo entre generaciones reducido
 λ_i constante de decaimiento del i-ésimo grupo precursor de neutrones retardados.
C_i concentración de precursores del i-ésimo grupo en un instante dado
q número de neutrones producidos por unidad de tiempo dentro del sistema por una fuente exterior.
b_i producción relativa de neutrones retardados por el i-ésimo grupo.
s variable del espacio transformado de Laplace.
A intensidad de la fuente externa constante de neutrones.
A_j coeficientes del término G (s)
T período del reactor
¢ centavos de dólar unidad de reactividad 1\$ 0.0075.

REFERENCIAS

- [1] Henry A., Reactor Analysis, MIT, 1975
- [2] Keepin G., Physics of Nuclear Kinetics, Addison Wesley, 1965
- [3] Zúñiga A., Calibración de Barras del RP - 0, Lima Instituto Peruano de Energía Nuclear, Dirección de Reactores, Informe 3 (1980)
- [4] LFEN-N1-10 Publicações Do Laboratorio de Física e Engenharia Nucleares, Sacaven, Junta de Energía Nuclear, Portugal, 1963.
- [5] Fiestas C., Medición del Tiempo Muerto de los Canales de Detención del Reactor RP - 0, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Dirección de Reactores, Lima, Informe 4 (1980).
- [6] Camberra Industries, Inc., Operating Manual, Multichannel Analyzer Serie 30, 1977.

Métodos experimentales de medición de reactividad por Agustín Zúñiga se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.